

空港コンクリート舗装版の疲労度に対する 非線形温度分布の影響

尾関孝人¹・西澤辰男²・松井邦人³・河野広隆⁴

¹正会員 工修 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 16F)

E-mail : oztkkt00@pub.taisei.co.jp

²正会員 工博 石川工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒929-0392 河北郡津幡町北中条タ1)

³フェロー会員 Ph.D. 東京電機大学 建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

⁴正会員 工博 京都大学 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター)

空港コンクリート舗装の構造設計においては、版に生じる温度応力が重要となる。版厚の厚い空港コンクリート舗装においては、版内の温度分布が非線形となり、この非線形温度分布により生じる温度応力は、線形温度分布で算定したものとは異なってくる。そこで、本研究では、3DFEMを用いてコンクリート舗装版の非線形温度分布を考慮した温度応力およびその頻度分布を算定し、線形温度分布を考慮したものとの比較を行った。また、航空機荷重応力についても同様に3DFEMを用いて算定し、上述した温度応力と併せて考慮することで、コンクリート舗装版に生じる疲労度を算定した。その結果、コンクリート舗装版の疲労度を与える温度分布の非線形特性の影響は非常に大きく、線形温度分布を考慮した場合よりも、大きく疲労度を低減できることが明らかとなった。

Key Words : airport concrete pavement, nonlinear thermal distribution, thermal stress, fatigue damage, 3DFEM

1. はじめに

空港コンクリート舗装の構造設計では、設計供用期間中の健全性を確保するため疲労度設計を行い、版厚を設定する。疲労度設計において考慮する応力は、航空機荷重により発生する荷重応力、およびコンクリート版の温度変化による変形が版の自重及び路盤との摩擦により生じる温度応力がある。現行の疲労度設計における疲労度算定式を以下に示す。

$$F_d = \sum_p \sum_l \sum_T \frac{f_p f_l f_T N_{total}}{N_{allowable}(\sigma_{pl}, \sigma_T)} \quad (1)$$

ここに、

F_d : 疲労度

f_p : 航空機荷重応力 σ_p が発生する頻度

f_l : 航空機荷重が載荷位置 l に位置する頻度

f_T : コンクリート舗装版上下面温度差が ΔT となる頻度

N_{total} : 設計供用期間における航空機交通量

$N_{allowable}$: σ_{pl} および σ_T が作用する際の許容繰返し回数

σ_{pl} : 航空機荷重が載荷位置 l に位置する場合に生じる航空機荷重応力

σ_T : コンクリート舗装版上下面温度差が ΔT となる場合

に生じる温度応力

コンクリート舗装版に生じる温度応力については以下に示すような Westergaard のそり拘束応力¹⁾(式(2))を基にした岩間の提案式²⁾(式(3))が一般的に用いられてきた。

$$\text{Westergaard の式(版縁部)} : \sigma_T = \frac{C\alpha E\Delta T}{2} \quad (2)$$

$$\text{岩間の式(版縁部)} : \sigma_T = 0.7 \times \frac{C\alpha E\Delta T}{2} = 0.35C\alpha E\Delta T \quad (3)$$

ここに、

σ_T : 版縁部の温度応力(N/mm²)

C : そり拘束係数

α : コンクリートの線膨張係数(1/°C)

E : コンクリートの弾性係数(N/mm²)

ΔT : コンクリート舗装版の上下面温度差(°C)

岩間の提案式は、厚さ 20cm と 25cm のコンクリート舗装版に対する長期観測結果より算定したものである。この長期観測において推定された温度応力は、そり拘束応力の概ね 0.7 倍となることが確認されている。これは、版底面のそり拘束応力が引張最大となる時に、版内温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力は圧縮となるためである。そこで岩間の提案式は、(式2)に示す Westergaard

の式に対して、0.7 倍した値を温度応力として提案している。しかしながら、版厚の厚い空港コンクリート舗装においては、版厚方向の温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力が岩間の提案式で想定していたものよりも大きくなる。そのため、空港コンクリート舗装版に生じる温度応力は、従来の岩間の提案式で算出された温度応力よりも小さくなると考えられる。坪川らは空港コンクリート舗装における温度応力について実験的な検討を行い、実用的な実験式を導いている³⁾。一方、コンクリート舗装版の上下面温度差 ΔT ではなく、3DFEM 等の数値解析により版内温度分布を入力し直接温度応力を算定した場合、疲労度は温度応力の頻度を考慮し、以下のように求められる。

$$Fd = \sum_p \sum_l \sum_T \frac{f_p f_l f_{\sigma_T} N_{total}}{N_{allowable}(\sigma_{pl}, \sigma_T)} \quad (4)$$

ここに、

f_{σ_T} : 温度応力が σ_T となる頻度

本研究では既往の研究によりその適用性が証明された⁴⁾3DFEM によりコンクリート舗装版の非線形温度分布特性を考慮した温度応力を算定し、疲労度計算を実施した。その結果から、非線形温度分布特性がコンクリート舗装版の疲労度に与える影響について検討した。

2. 熱伝導解析による版内温度分布の算定

3DFEM による温度応力解析においては、版内温度分布を入力する必要がある。本研究では、熱伝導解析により算定した版内温度分布を入力した。熱伝導解析はコントロールボリューム法を用いて行うが、この方法は着目している節点と隣接する節点の中央で切断した有限な厚さ

表-1 各層の層厚・熱特性値

コンクリート	層厚(mm)	460
	密度(kg/m ³)	2350
	比熱(J/(kg・K))	1050
	熱伝導係数(W/(m・K))	4.0
アスファルト層	層厚(mm)	210
	密度(kg/m ³)	2350
	比熱(J/(kg・K))	900
	熱伝導係数(W/(m・K))	0.7
下層路盤	層厚(mm)	400
	密度(kg/m ³)	1800
	比熱(J/(kg・K))	800
	熱伝導係数(W/(m・K))	0.5
路床	層厚(mm)	1600
	密度(kg/m ³)	1800
	比熱(J/(kg・K))	800
	熱伝導係数(W/(m・K))	0.5

の層に流入・流出する熱エネルギーの収支が釣合うという条件から版内温度分布を算定する。

熱伝導解析を行ううえで、比熱・熱伝導率等の熱特性値を設定する必要がある。アスファルト層・下層路盤・路床については一般的な値を用いた。また、コンクリートの熱特性値については、熱伝導解析を行い、計測値の版内温度分布と比較することにより熱特性値の推定を行った。舗装表面の境界条件は、計測された表面温度を入力した⁴⁾。なお、初期値として計測開始時の表面温度が深さ方向に一定として入力している。後述する頻度分布等のデータ整理においては、初期値の影響を受けない時点からのデータを使用した。表-1 に各層の層厚・熱特性値を、図-1 に版内温度分布の計測値との比較結果を示す⁴⁾。計測値と解析値は、同様の傾向を示している。図-7 における夏期・冬期において版底面の誤差が大きいが、データ全体での計測値と解析値の相関係数は 0.99 であり、相関性は高い。本研究では、上述したように熱物性としては推定値を用いているため、このような誤差が生じた。実際の設計においては、これら熱物性値について、正確な値を入力する必要がある。

3. 3DFEM による温度応力解析

(1) 3DFEM による温度応力算定

本研究で用いた3DFEMプログラムPave3D⁵⁾は、各点における温度を与えて、温度応力を計算することができる。Pave3Dによる温度応力解析の詳細は文献4)に譲り、その概要を述べる。温度応力は次式で算定される。

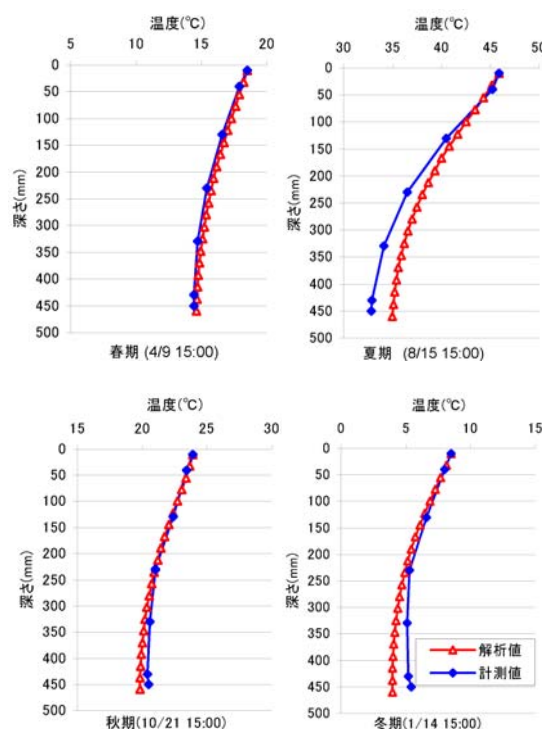


図-1 コンクリート版内温度分布

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_T\}) = [D]\{\varepsilon_C\} \quad (5)$$

ここに、 $\{\sigma\}$:応力ベクトル、 $[D]$:弾性マトリックス、 $\{\varepsilon\}$ 全ひずみ、 $\{\varepsilon_T\}$:温度ひずみ、 $\{\varepsilon_C\}$:拘束ひずみであり、以下のようになる。

$$\{\varepsilon_T\} = \{\alpha T \quad \alpha T \quad \alpha T \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \quad (6)$$

ここに、 T はその点における温度である。3DFEMでは、体積積分でガウス点での温度が必要になるため、任意の点の温度を得る必要がある。そこで、本研究においては、 T を版深さ z の2次関数と仮定して、3DFEMに入力した。

(2) 3DFEMモデル

図-2に示すように、3DFEMは8.5m×8.5mの厚さ460mmのコンクリート舗装版の下に、210mmのアスファルト層、400mmの粒状路盤、1600mmの路床を考慮したモデルに対して実施した。モデルの対象性を考慮し、4分割したものを考慮している。コンクリート層は非線形温度分布を考慮できるように、版深度方向に6個の層に分割した。また、コンクリート層とアスファルト層の間には境界要素

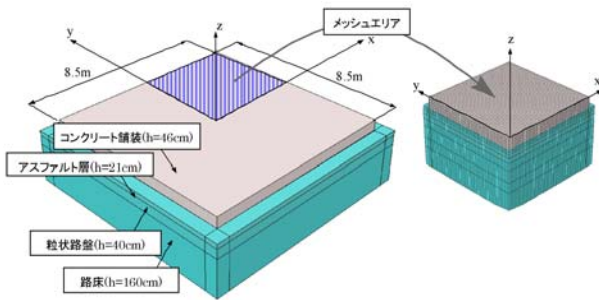


図-2 3DFEMモデル

表-2 各層の物性値

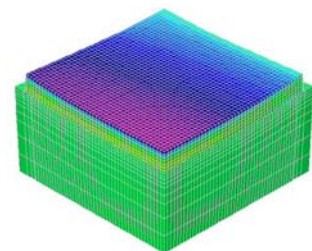
コンクリート層	
弾性係数(N/mm ²)	39900
ポアソン比	0.206
線膨張係数(1/°C)	0.00000889
単位体積重量(kN/m ³)	23.5
厚さ(mm)	460
境界層	
水平方向ばね定数(N/mm ² /m)	0.1
鉛直方向ばね定数(N/mm ² /m)	10000
アスファルト層	
弾性係数(N/mm ²)	2000
ポアソン比	0.35
厚さ(mm)	210
粒状路盤	
弾性係数(N/mm ²)	500
ポアソン比	0.35
厚さ(mm)	400
路床	
弾性係数(N/mm ²)	100
ポアソン比	0.35
厚さ(mm)	1600

を入れ、コンクリート舗装版の反り変形についても考慮できるようにしている。アスファルト層・粒状路盤・路床についてはxy方向に有限な広がりを持ち、境界条件としてx、y方向の変位は固定としている。またz方向の境界条件についてはアスファルト層・粒状路盤は自由に變形するものとし、路床については底面を固定するものとした。またコンクリート層の境界条件としてx、y、z方向に自由に變形するものとしている。3DFEMに入力する各層の物性値は表-2に示すように設定した。コンクリート層については、計測を行ったコンクリート舗装版の実験値を、アスファルト・粒状路盤・路床については一般的な値を用いた。このモデルに、2章で示したような熱伝導解析から得られた版内温度分布を二次曲線として近似したものを入力し、1年間分の温度応力を算定した。

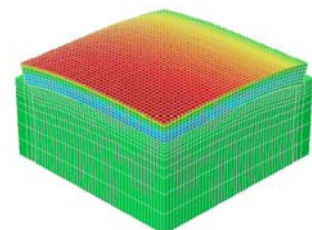
(3) 3DFEM解析結果

a) コンクリート舗装版の变形について

図-3に早朝および昼間のコンクリート舗装版の变形状態を示す。早朝においては、コンクリート舗装版の版上下面温度差は負(版上面温度<版下面温度)となり、版縁部および隅角部が反り上がるような变形となる。一方、昼においては、版上面温度差が正(版上面温度>版下面温度)となり、版中央部が反るような变形となる。しかし、版中央部の反りはコンクリート舗装版自体の自重により抑えられるため、版中央部の反り変形量は比較的小さい値となる。また、版に生じる応力については、版上下面温度差が負の場合は版表面：引張応力・版底面：圧縮応力となり、版上下面温度差が正の場合はその逆となる。



(a) 5:00 (版上下面温度差：負)



(b) 13:00 (版上下面温度差：正)

図-3 版内温度分布によるコンクリート舗装版の变形状態
(3DFEM解析結果)

b) 非線形温度分布特性に対する検討

図-4 に、ある日の 11:00(版上下面温度差 10.6℃)および 15:00(版上下面温度差 11.6℃)の版内温度分布およびその版内温度分布を入力し 3DFEM により算定した版内温度応力温度分布を比較したものを示す。

版上下面温度差は 1℃しか変わらないため、(式 3)のような従来の算定式により温度応力を算定すれば温度応力は殆ど変わらないはずである。しかし、3DFEM により算定した版底面の温度応力は 0.86N/mm^2 (従来の算定式よりも約 50%程度小さい)の差がある。これは上記 11:00 および 13:00 の温度分布の結果について、非線形性が異なることにより生じたものと考えられる。したがって、空港コンクリート舗装のように版厚が厚い場合には、版上下面温度差のみから温度応力を算定することは適切ではないことが分かる。

また、図-4(b)に示すように、版内温度分布を非線形とせず、版上下面温度差のみから線形温度分布と仮定した場合は、版底面に生じる温度応力は過大に評価していることが分かる。

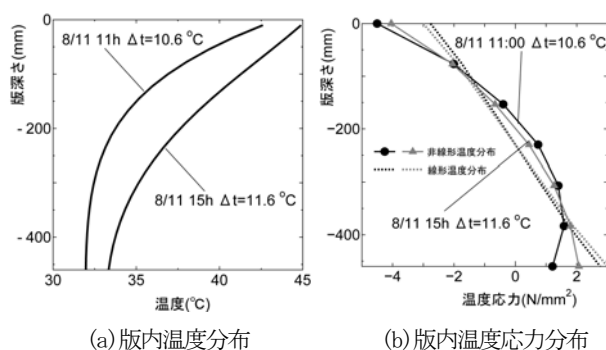


図-4 版中央部における温度応力の比較

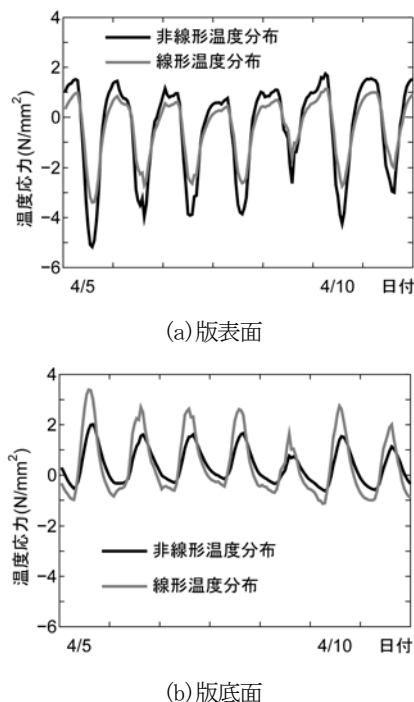


図-5 版中央部における温度応力の比較

図-5 に 3DFEM により算定された版中央部の温度応力の 1 週間の変動について、非線形温度分布および線形温度分布を入力した場合を比較したものを示す。図-5(a)に示すように、1 週間の温度応力の変動をみた場合にも、版底面の温度応力は非線形温度分布を考慮した場合の方が線形温度分布の場合よりも小さい。一方で版表面については、線形温度分布の場合の方が、非線形温度分布の場合よりも温度応力は小さい。以上のことから、版内温度分布の非線形性を考慮することにより、版底面の温度応力は線形温度分布を考慮した場合よりも小さくなり、疲労度も低減できることが予想される。

また、図-6 に版中央部と版縁部の温度応力を比較したものを示す。版中央部の方がわずかに版縁部よりも温度応力大きい。

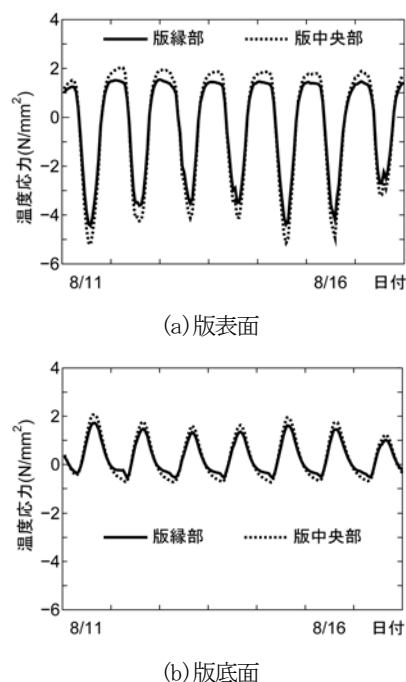


図-6 版中央部・縁部の温度応力の比較

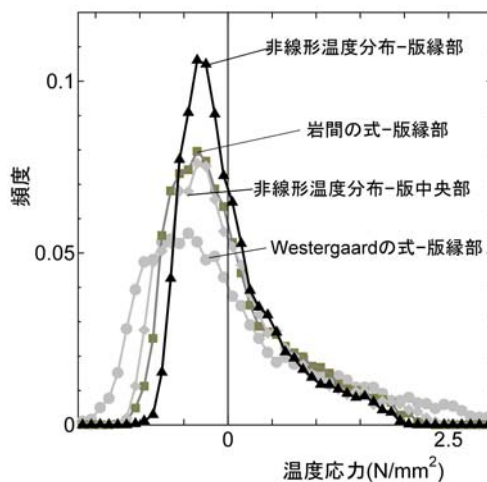


図-7 版底面の温度応力頻度分布

c) 温度応力の頻度分布

3DFEMにより算定した1年間分の温度応力算定結果を整理し、温度応力の頻度分布を算定した。図-7に版底面の温度応力頻度分布を示す。熱伝導解析より得られた非線形温度分布を入力し3DFEMにより算定した版中央部・縁部の温度応力と、熱伝導解析により得られた版上下面温度差を入力しWestergaardの式(式2)および岩間の式(式3)により算定した版縁部の温度応力の頻度分布を比較したものである。

岩間の式から算定した温度応力頻度分布は、Westergaardの式から算定したものと比較して、低温度応力域の範囲に分布していることが分かる。これは、岩間の式がWestergaardの式よりも温度応力を30%低減して算定しているためである。どちらの結果においても、圧縮領域において温度応力頻度分布のピーク値を示している。

一方で、3DFEMにより算定した温度応力は、版中央部の方が版縁部よりも広い範囲で分布していることが分かる。3DFEMにより算定した版縁部の温度応力の頻度分布は、高引張域での頻度は岩間の式によるものの方が大きい。つまり3DFEMで算定したものは高引張域での温度応力の頻度は岩間の式により算定したものよりも小さく、したがって疲労度も小さく評価できると考えられる。

4. 疲労度解析

(1) 前提条件

本章では、温度応力がコンクリート舗装版に及ぼす影響について検討した。

実際のコンクリート舗装版の疲労度解析では、複数の種類の航空機荷重、およびその交通量を考慮しなければならない。また、温度応力については航空機荷重が作用する時刻に応じた組み合わせを考慮する必要がある。しかし、本研究では、温度応力の算定方法の相違がコンクリート舗装版に及ぼす影響を相対的に評価することに主眼を置いている。そこで、以下に示すような仮定の条件を設定し、疲労度を算定することとした。

航空機荷重・載荷位置はB747-400・横目地縁部載荷の1ケースとし、航空機荷重総交通量 N_{total} は60,000回と仮定した。また、温度応力については航空機荷重が作用する時刻を特に考慮せず、3章で示した1年間分の温度応力頻度分布を用いることとした。

(2) 疲労曲線

コンクリート舗装版の疲労度は、式(1)または式(4)により算定されるが、航空機荷重応力および温度応力が作用する際の許容繰返し回数 $N_{allowable}$ は下式により算定する。

$$N_{allowable} = 10^{((a-SL)/b)} \quad (7)$$

$$a = 1.11364 + 0.00165P_f$$

$$b = 0.09722 - 0.00021P_f$$

ここに、

SL : 応力レベル(=合成応力 σ_c /設計曲げ強度 σ_a)

σ_c : 航空機荷重応力 σ_{pl} + 温度応力 σ_T

σ_a : 本研究においては 5.0N/mm^2 と設定

P_f : 破壊確率(本研究では10%と設定)

(3) 航空機荷重応力の算定

前章では、疲労度解析に必要となる温度応力およびその頻度分布を算定したが、ここでは航空機荷重応力およびその頻度分布を算定する。航空機荷重応力は温度応力解析と同様に3DFEMを用いて算定した。モデル図を図-8に示す。ダウエルバーによる荷重伝達を適切に評価するために9枚版モデルとした。各層の物性値は、温度応力解析時と同様に表-2の値を用いる。

また、版同士をつなぐダウエルバーは直径 $\phi=38\text{mm}$ 、長さ $l=700\text{mm}$ 、ピッチ 400mm とし、弾性係数は 210GPa 、ポアソン比は 0.3 と設定した。航空機脚荷重の脚配置は図-9に示すとおりであり、離陸時の脚荷重は 233kN 、着陸時の脚荷重は 168kN となる。航空機の横断方向の走行分布 f_l は標準偏差 σ を 0.9m として正規分布するものと仮定した。本研究では、図-10に示すように航空機荷重は x 方向に7箇所の位置に分布するものと仮定した。上記7

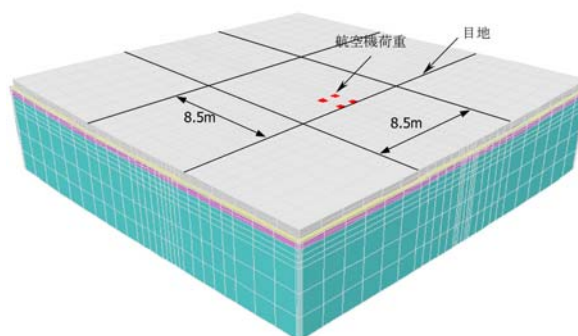


図-8 航空機荷重応力算定時の3DFEMモデル

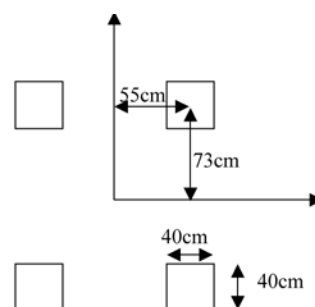


図-9 航空機脚荷重配置(B747-400)

箇所の各々の位置に航空機荷重が载荷した場合の横目地縁部の応力分布を算定した。

図-11 に横目地縁部における航空機荷重応力の分布について、全载荷位置に対する結果(Case1～Case7)を比較したものを示す。どの位置に载荷したとしても、コンクリート舗装版に生じる航空機荷重応力は 2.5N/mm^2 となり、全結果とも同様の形状を示していることが分かる。

この航空機荷重応力分および図-10 に示す航空機荷重载荷位置の頻度分布を用いて、コンクリート舗装版内の任意の位置における航空機荷重応力の頻度分布を算定した。この航空機荷重応力の頻度分布温度応力の頻度分布と併せて考慮することで、任意の点における疲労度を算定する。

(4) 疲労度の算定

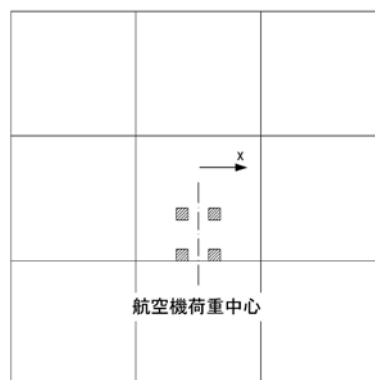
疲労度は前章で示した温度応力の頻度分布(図-7)および航空機荷重応力の頻度分布(図-10)と式(4)を用いて算定した。図-12 に横目地縁部上の任意の点における疲労度分布を示す。温度分布の非線形性を考慮した 3DFEM による温度応力、Westergaard および岩間の提案式により算定した温度応力を用いた疲労度算定結果を比較している。温度応力が最も大きく算定される Westergaard の式を用いた場合、疲労度が 242.1 と最も大きくなることが分かる。また、30%の温度応力の低減を考慮した岩間の提案式を用いた場合は、疲労度は大きく低減され 1.52 となる。更に、温度分布の非線形性を考慮した 3DFEM による温度応力を用いた場合の疲労度は、岩間の提案式の場合の 1/3 程度の 0.48 を示している。このように、版厚が厚い空港コンクリート舗装の場合、厚い版厚での温度分布の非線形性を考慮して、温度応力を算定することにより、疲労度も大きく低減できることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、空港コンクリート舗装に生じる温度応力を、熱伝導解析から得られた温度分布を用いて 3DFEM により算定した。また、その温度応力および同じく 3DFEM により算定した航空機荷重応力より疲労度を算定した。本研究で得られた知見は以下のようにまとめられる。

- (a) $t=460\text{mm}$ のような版厚が厚い版の場合は、その温度分布の非線形性により、版上下面温度差が同じであっても温度応力分布は大きく異なることが確認された。
- (b) 従来用いられてきた算定式による温度応力よりも、温度分布の非線形性を考慮し 3DFEM により算定した温度応力の方が版底面では小さく、版表面では大きくなることを確認された。
- (c) 3DFEM による温度応力・航空機荷重応力を用いて疲労度を算定した結果、従来の提案式による温度応力

を用いた場合よりも、大きく疲労度が低減することが確認された。



Case	航空機荷重中心位置	頻度 f_i
Case1	$x=0$	0.20
Case2	$x=-50\text{cm}$	0.18
Case3	$x=-100\text{cm}$	0.14
Case4	$x=-150\text{cm}$	0.08
Case5	$x=50\text{cm}$	0.18
Case6	$x=100\text{cm}$	0.14
Case7	$x=150\text{cm}$	0.08

図-10 航空機脚荷重の载荷位置およびその頻度分布

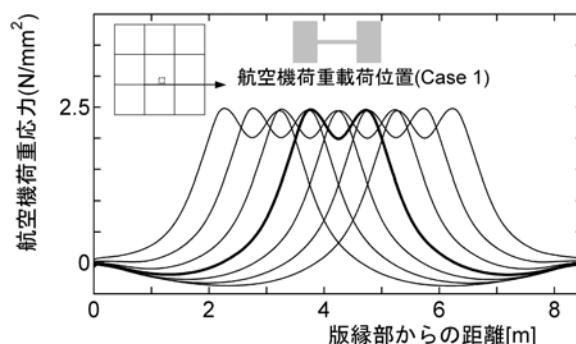


図-11 横目地縁部における航空機荷重応力分布

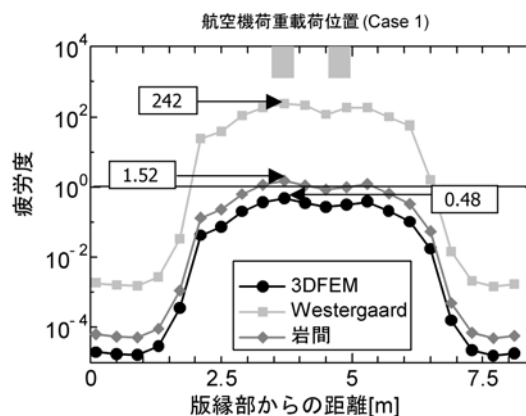


図-12 横目地縁部における疲労度算定結果
(温度応力の算定法毎の比較)

参考文献

- 1) Westergaard, H.M. : Analysis of Stresses in Concrete Roads Caused by Variation of Temperature, Proceedings of the annual meeting, Highway Research Board, pp201-215, 1926.
- 2) 岩間滋 : コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.111, pp16-46, 1964.
- 3) 坪川将丈, 水上純一, 八谷好高, 亀田昭一 : 日温度変化による空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第 12 巻, pp157-164, 2007
- 4) 尾関孝人, 西澤辰男, 加藤浩司 : 空港コンクリート舗装版の温度分布特性, 土木学会舗装工学論文集, 第 13 巻, pp141-148, 2008
- 5) 西澤辰男 : 3 次元 FEM に基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発, 土木学会舗装工学論文集, 第 5 巻, pp.112-121, 2000.

EFFECTS of TEMPERATURE DISTRIBUTION NONLINEARITY in THICK CONCRETE SLAB on FATIGUE DAMAGE

Takato OZEKI, Tatsuo NISHIZAWA, Kunihiro MATSUI, and Hirotaka KAWANO

Thermal stress caused by temperature distribution throughout slab depth in concrete slab is important in the structural design of airport concrete pavements. Airport concrete pavement slab is very thick, therefore, temperature in the slab varies nonlinearly throughout slab depth. In this study, the nonlinear thermal stresses were calculated with 3DFEM. Fatigue damage of thick airport pavement slab was estimated by calculating loading stress due to an aircraft gear and the calculated thermal stress. The effect of nonlinearity in the thermal stress on fatigue damage of thick concrete pavement slab was found to be significant. The linear thermal stress resulted in overestimated fatigue damage on thick concrete pavement, even if the reduction factor was introduced to account for the effect of internal stress component.